

Рис. 2. Теоретична та експериментальна статичні характеристики ультразвукового рівноміра

Відхилення статичної характеристики від прямої 1 залежить від фізичних параметрів рідини та умов експлуатації рівноміра (тиску, температури та складу рідинного середовища). Для нормальних умов експлуатації при великих густинах рідини статична характеристика рівноміра співпадає з прямою 1.

Якщо в рівнянні (12) обмежитися тільки лінійною складовою експоненціальної функції, то коефіцієнт передачі приладу описуватиметься таким рівнянням

$$K = K_0 \left\{ 1 - \frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} \left[1 - \frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p} \right] \right\}. \quad (14)$$

де $K_0 = \frac{M_c P V_m}{848 Z D_c} \sqrt{\frac{vR}{N}}$ - коефіцієнт передачі ідеальної статичної характеристики рівноміра.

З рівняння (14) видно, що коефіцієнт передачі ультразвукового рівноміра являє собою функцію багатьох змінних, котрі можуть викликати похибки вимірювання.

Висновки. На процес перетворення в ультразвукових рівномірах впливають різноманітні внутрішні та зовнішні фактори. До основних впливаючих факторів відноситься тиск, температура та хімічний склад газового середовища, через яке розповсюджуються ультразвукові коливання. Отримані математичні моделі для описання похибок вимірювання, обумовлених цим впливом. Теоретично та експериментально показано, що найбільші похибки вимірювання виникають за рахунок зміни температури і тиску газового середовища. Виконано дослідження впливу фізико-хімічних параметрів рідини на точність вимірювання її рівня. Показано, що зменшення густини та вязкості рідини призводить до появи додаткових похибок вимірювання, які обумовлені збільшенням енергії поглинання ультразвукових коливань.

Література: 1. Стенцель Й.І., Томсон А.В. Електродеформаційні процеси в п'єзоелектричних перетворювачах. В сб. „ Системы контроля и управления технологическими процессами. – Луганск: Світлиця, 2006. – С. 144-150. 2. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: Гос.науч.техн. изд-во хим. литературы, 1961. – 820 с. 3. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. – Л.: Химия, 1986. – 432 с. 4. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.

УДК 681.586.773

А. В.РЯБИЧЕНКО, Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р техн. наук, СНУ ім.В.Даля

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РІВНОМІРА РІДИНИ З КОМПЕНСУЮЧИМ ВХІДНИМ СИГНАЛОМ

Пропонується новий принцип роботи ультразвукового рівноміра, який заснований на адаптивному зрівноваженні вхідного сигналу. Приведені математичні моделі такого рівноміра і результати його теоретичних та експериментальних досліджень. Показано, що статичні характеристики ультразвукового рівноміра з компенсуючим вхідним сигналом є квадратичними. Даються рекомендації щодо зменшення зони нечутливості рівноміра та підвищення точності контролю.

The new principle of operation of the ultrasonic liquid level meter, which is based on an adaptive equilibration of an input signal is offered. The mathematical models of this liquid level meter and the results its theoretical and experimental researches are given. It is shown, that static

performances of a ultrasonic liquid level meter with a compensating input signal are quadratic. The recommendations on diminution of a dead band of a liquid level meter and increase of precision of the check are given.

Ультразвукові рівнеміри (УЗР) рідин знаходять все ширше використання в промисловості через свою високу надійність і точність вимірювання. Але в таких областях промисловості як хімічній і нафтовій, в яких необхідно вимірювати рівень рідин з достатньо високою точністю, у технологічних апаратах під тиском, високих температурах, при зміні складу газового середовища ультразвукові рівнеміри мають достатньо великі додаткові похибки вимірювання, котрі обумовлені різними впливаючими факторами. З метою зменшення цих похибок у сучасних рівнемірах використовуються різні методи. Тому підвищення точності контролю рівня хімічно складних і летколетких речовин є актуальною задачею.

Метою роботи є дослідження ультразвукового методу, який дозволить зменшити похибки вимірювання і тим самим підвищити точність вимірювання рівня складних рідин, а також зменшити зону нечутливості.

Відомо [1, 2], що робота більшості сучасних УЗР полягає у вимірюванні часу $\Theta = 2t_p$, де t_p час, за який випромінюваний сигнал досягає поверхні рідини. Час t_p залежить від фізико-хімічних параметрів газового середовища, через яке розповсюджуються ультразвукові коливання (УЗК), що викликає значні додаткові похибки вимірювання.

У даній роботі розглядається новий принцип вимірювання рівня, в якому вимірюється амплітуда електричного імпульсу, який збуджує УЗК, при зрівноваженні електрорушійних сил (ЕРС), котрі індукуються п'єзоелектричним перетворювачем (ПЕП), при відбитті УЗК від механічного репера (пластини) та поверхні вимірювального середовища. Ультразвуковий сигнал (УЗС) E_{op} , який подається на реперну пластину, має однакову частоту f та амплітуду E_{op} незалежно від вимірюваного рівня. Відбитий від реперної пластини та сприйнятий п'єзоелементом УЗС e_p залежить від фізико-хімічних параметрів газового середовища. Сигнал e_p можна описати наступним рівнянням [2]

$$e_p = E_p \left\{ \left[\frac{1 - \exp(-\alpha_{1p}n|2J_p/c-t|)}{\cos(\omega n(2J_p/c-t))} \right] (1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n|2J_p/c-t|)) \right\}, \quad (1)$$

де E_p - амплітуда електричного сигналу, який збуджує УЗК для подачі його на репер; J_p - відстань від ПЕП до репера; α_{1p} - ступінь загасання УЗС у газовому середовищі на відстані J_p ; c - швидкість розповсюдження УЗК у газі; t - поточний час розповсюдження УЗК; k_0 - стала; ω - частота власних коливань ПЕП; n - поправочний коефіцієнт, який залежить від властивостей п'єзоелемента (для випромінюючого УЗС $n = 10 - 30$, а для відбитого $n = 5 - 10$).

ЕРС e_L , яка створюється ПЕП при сприйнятті відбитого від поверхні рідини УЗС, описується таким рівнянням:

$$e_L = E_L \left\{ \left[\frac{1 - \exp(-\alpha_{1L}n|2J_L/c-t|)}{\cos(\omega n(2J_L/c-t))} \right] (1 - k_0 \exp(-\alpha_{1L}n|2J_L/c-t|)) \right\} * \left[\exp(-\alpha_2 n|2J_L/c-t|) \right], \quad (2)$$

де E_L - амплітуда електричного сигналу, який збуджує УЗК для подачі його на поверхню рідини; J_L - відстань від ПЕП до поверхні рідини; α_{1L} - ступінь загасання УЗ сигналу в газовому середовищі на відстані J_L ; α_2 - ступінь загасання УЗК в рідині.

У режимі компенсації незалежно від відстані J_L виконується рівність: $e_L = e_p$ або $e_L/e_p = 1$. У рівняння (1) уведемо наступні позначення:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 - \exp(-\alpha_{1p}n(2J_p/c-t)), \quad A_2 = 1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n(2J_p/c-t)), \\ A_3 &= \cos(\omega n(2J_p/c-t)), \quad B_1 = 1 - \exp(-\alpha_{1L}n(2J_L/c-t)), \\ B_2 &= 1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n(2J_L/c-t)), \quad B_3 = \cos(\omega n(2J_L/c-t)), \\ B_4 &= 1 - \exp(\alpha_2 n(2J_L/c-t)). \end{aligned}$$

Розкладемо ці рівняння в ряд Маклорена та обмежимося тільки їх лінійною частиною. У результаті маємо:

$$\begin{aligned} A_1 &= \alpha_{1p}n(2J_p/c-t), \quad A_2 = \alpha_{1p}n(2J_p/c-t), \quad A_3 = 1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c-t)^2, \\ B_1 &= \alpha_{1L}n(2J_L/c-t), \quad B_2 = \alpha_{1L}n(2J_L/c-t), \quad A_3 = 1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c-t)^2, \\ B_4 &= 1 - \alpha_2 n(2J_L/c-t). \end{aligned}$$

Приймаючи, що $t = 0$, знайдемо такі відношення:

$$D_1 = \frac{A_1}{B_1} = \frac{\alpha_{1p}J_p}{\alpha_{1L}J_L}, \quad D_2 = \frac{A_2}{B_2} = \frac{\alpha_{1p}J_p}{\alpha_{1L}J_L}, \quad D_3 = \frac{A_3}{B_3} = \frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L/c)^2}.$$

З врахуванням цього отримуємо наступну формулу для визначення робочого збуджуючого електричного сигналу в такій формі

$$E_L = E_p \left(\frac{\alpha_{1L}J_L}{\alpha_{1p}J_p} \right)^2 \left\{ \frac{1}{(1 - 2\alpha_2 nJ_L/c)} \left[\frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L/c)^2} \right] \right\}. \quad (3)$$

Якщо множник у фігурних дужках мало впливає на характер залежності $E_L = f(J_L)$, то позначивши

$$N = \frac{1}{(1 - 2\alpha_2 n J_L / c)} \cdot \left[\frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_P / c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L / c)^2} \right], \text{ одержуємо наступне рівняння статичної характеристики рівнеміра}$$

$$E_L = E_P (\alpha_{1L} N / \alpha_{1P} J_P^2) J_L^2. \quad (4)$$

Так як відстань J_P від поверхні п'єзoeлемента до реперної пластини і збуджуючий електричний сигнал E_P , який подається на цю пластину, є фіксованими величинами, то їх відношення являтиме собою деяку сталу, яка залежатиме тільки від фізико-хімічних параметрів газового середовища. Якщо прийняти, що множник у круглих дужках рівняння (4) є сталою величиною, яка характеризує чутливість перетворення, то залежність $E_L = f(J_L)$ матиме квадратичну форму. Практично ступінь поглинання УЗК газом залежить як від частоти УЗК, так і від таких параметрів як температура, тиску, концентрації компонентів газового середовища тощо. Тому залежність $E_L = f(J_L)$ тим більше відхиляється від квадратичної, чим більший коефіцієнт поглинання УЗК. При великих значеннях коефіцієнта поглинання може наступити режим повного поглинання, при якому УЗК повністю поглинаються газом і не досягають п'єзoeлемента після їх відбиття від поверхні рідини, або навіть не доходять до цієї поверхні.

Якщо поглинання УЗК підпорядковується закону Бугера-Бера, то

$$I_{PP} = I_{0P} \exp(-k_\Gamma J_P), \quad (5)$$

де k_Γ - коефіцієнт поглинання УЗК газовим середовищем.

Зменшення амплітуди УЗК обумовлюється поглинанням енергії газовим середовищем на відстані J_L і може бути описане таким рівнянням

$$I_{PL} = I_{0L} \exp(-k_\Gamma J_L), \quad (6)$$

Ступінь загасання УЗС газом на відстані J_P дорівнює

$$\alpha_{1P} = I_{PP} / I_{0P} = \exp(-k_\Gamma J_P), \quad (7)$$

а ступінь загасання на відстані J_L

$$\alpha_{1L} = I_{PL} / I_{0L} = \exp(-k_\Gamma J_L). \quad (8)$$

Відношення

$$\alpha_{1L} / \alpha_{1P} = \exp[-k_\Gamma (J_L - J_P)]. \quad (9)$$

Підставимо рівняння (9) у (4). У результаті одержуємо

$$E_L = E_P (N / J_P^2) J_L^2 \exp[-k_\Gamma J_L (1 - J_P / J_L)]. \quad (10)$$

Рівняння (10) є математичною моделлю ультразвукового рівнеміра з компенсацією вхідного сигналу.

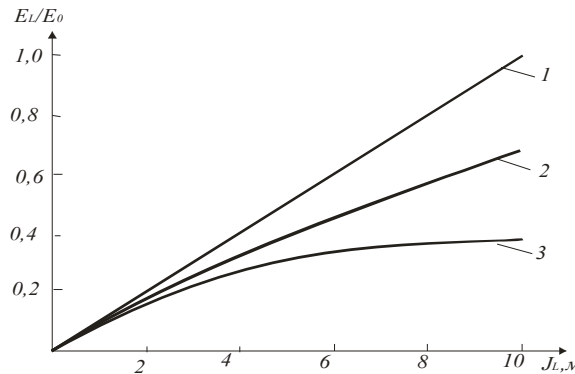


Рис. 1. Статична характеристика рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня для коефіцієнтів поглинання: 1 - $k_\Gamma = 0.0015$;

2 - $k_\Gamma = 0.01$; 3 - $k_\Gamma = 0.03$

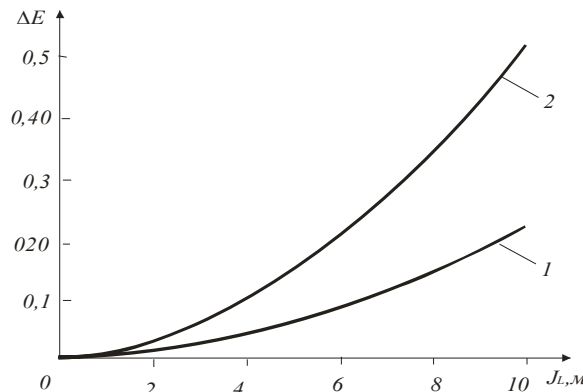


Рис. 2. Відхилення статичних характеристик рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня від лінійної для коефіцієнтів поглинання:
1 - $k_{\Gamma} = 0.01$; 2 - $k_{\Gamma} = 0.03$

Якщо коефіцієнт поглинання УЗК незначний, то статична характеристика приладу практично має квадратичну форму так як параметр N близький до одиниці в широких межах вимірювання рівня. На рис. 1 приведена ця залежність з блоком вилучення квадратного кореня. Дослідження показали, що відхилення теоретичної характеристики від експериментальної незначні і не перевищують 0,35 % від максимальної відстані, якщо газовим середовищем є повітря.

Якщо рівнемір з компенсуючим вхідним сигналом має блок вилучення квадратного кореня, то рівняння (10) приймає таку форму

$$E_L = J_L \sqrt{E_P \left(\frac{N}{J_P^2} \right) \exp \left[-k_{\Gamma} J_L \left(1 - \frac{J_P}{J_L} \right) \right]}. \quad (11)$$

Рівняння (11) показує, що відхилення від нелінійності викликати тільки підкореновий вираз. На рис. 2 показані залежності $E_L = f(J_L)$ для різних коефіцієнтів поглинання. З рис. 2 видно, що збільшення коефіцієнта поглинання УЗК газовим середовищем суттєво зменшує чутливість перетворення, а відповідно збільшує як мультиплікативну, так і нелінійні складові похибки вимірювання.

Висновки. Новий принцип вимірювання рівня рідини полягає у вимірюванні амплітуда електричного імпульсу, який збуджує УЗК, при наявності зрівноваження ЕРС, котрі індукуються ПЕП. При такому способі вимірювання час розповсюдження УЗК може використовуватися для компенсації впливу фізико-хімічних параметрів газового середовища.

Статична характеристика УЗР з компенсуючим вхідним сигналом є нелінійною, яка в основному обумовлюється фізико-хімічними параметрами газового середовища. Збільшення коефіцієнта поглинання газовим середовищем приводить до значного зростання мультиплікативної та нелінійних складових похибок вимірювання, а також до зменшення діапазону вимірювання.

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень можуть бути покладені в основу розробки методів підвищення точності вимірювання рівня ультразвуковим методом.

Література: 1. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичне моделювання ультразвукових рівномірів на основі теорії реологічних переходів. Матеріали другої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції „Актуальні проблеми сучасної науки”. – Київ: 2006. – с.78-81.2. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Теоретичні та експериментальні дослідження ультразвукових пьезоелектричних перетворювачів рівня рідин. Матеріали другої Міжнародної науково-практичної конференції „Розвиток наукових досліджень 2006”. – Полтава: 2006. – с.61-63.3. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. – Міжнародний НТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький. №2. – 2006, с. 55 – 58. 4.Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. УДК 681.586.773

А. В.РЯБІЧЕНКО, В.В. ЄВСЮКОВ, Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, проф. д-р техн. наук, СНУ ім.В.Дала

КОМПЕНСАЦІЙНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ РІВНЕМІР

Описується новий принцип вимірювання рівня рідини компенсаційним ультразвуковим рівнеміром за принципом визначення амплітуди збуджуючого сигналу, який сприймається п'єзокерамічним елементом після відбиття від реперного пристрою, і такого ж сигналу, який сприймається тим же елементом після відбиття від поверхні рідини. Приводиться математичне описання такого рівнеміра і показано, що він має зменшену зону нечутливості, практично не чутливий до зміни складу газового середовища, його температури і тиску.

The new principle of measurement of liquid's level by the compensating ultrasound level meter by a principle of definition of amplitude of a stimulating signal, which is perceived by piezoceramic element after reflection from the fiducial plate and after reflection from a surface of the liquid are observed. The mathematical description of this level meter is given. It is shown, that it has reduced zone to insensitivity, practically non-sensitive to change the gas ambience, the temperature and the pressures.

Сучасні ультразвукові рівнеміри (УЗР), як правило, мають реперний пристрій (репер) у вигляді пластини або шайби, від якої випромінений ультразвуковий сигнал (УЗС) відбивається та сприймається п'єзoeлектричним приймачем. При цьому вимірювальним блоком визначається час проходження цим сигналом подвійної відстані від випромінювача до репера. Такий метод уведення корекції в процес вимірювання є достатньо недосконалим, так як не враховує похибки, коли відстань до контрольованого рівня перевищує відстань до репера. З метою усунення цього недоліку пропонується компенсаційний УЗР. Такий спосіб вимірювання рівня значно зменшує зону нечутливості рівнеміра, а також підвищує точність контролю. Структурна схема компенсаційного рівнеміра приведена на рис. 1. На відміну від відомих рівнемірів, у яких амплітуда випроміненого сигналу є сталою, у запропонованому приладі амплітуда випроміненого сигналу в залежності від рівня рідини змінюється до тих пір, поки різниця між цими амплітудами не стане рівною нулю. Для врахування впливу температури газу, його тиску, а також складу газового середовища реперний пристрій розташовується в газовому середовищі на фіксованій відстані від п'єзoкерамічного випромінювача (ПКВ). Так як відбиті ультразвукові сигнали (УЗС) від репера та від поверхні контрольованого середовища проходять одне і теж газове середовище, то при їх зрівноваженні компенсується зміна параметрів цього середовища, що призводить до зменшення похибок вимірювання рівня. Рівнемір працює наступним чином. Після включення рівнеміра в роботу мікроконтролер видає управляючий сигнал на регулююче джерело імпульсів збудження, яке формує і видає на ПКВ електричний імпульс з мінімальною амплітудою. Одночасно обнуляється і включається лічильник тактових сигналів. ПКВ генерує УЗС, який відбивається від репера і сприймається тим же п'єзoкерамічним елементом, формуючи на його виході електричний сигнал. Останній нормується підсилювачем, перетворюється у цифровий код аналого-цифровим перетворювачем і запам'ятовується в блоці пам'яті. Після цього мікроконтролер ініціює подачу на ПКВ послідовності імпульсів з наростаючою амплітудою до величини, при якій запам'ятований електричний сигнал стане рівним сигналу, котрий сформований при відбитті УЗС від поверхні контрольованої речовини. Коли ці електричні сигнали стануть рівними нулю, то мікроконтролер виключає регульоване джерело імпульсів збудження і видає сигнал на блок оброблення інформації [1].



Рис. 1. Структурна схема компенсаційного ультразвукового рівнеміра

Статична характеристика компенсаційного рівнеміра є практично квадратичною, яку можна описати наступним рівнянням [2]

$$E = E_p \left(\frac{N}{J_p^2} \right) J_L^2 \exp \left\{ -n_0 \frac{J_L}{J_p} \left(1 - \frac{J_p}{J_L} \right) \right\} \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta e_p}{N_{0p}} \right) - 2k_{CT} J_p} \right], \quad (1)$$

де E_p - амплітуда випроміненого сигналу; N, N_{0p}, n_0, k_{CT} - сталі; J_p, J_L - відстань від випромінювача до реперного пристрою та поверхні рідини відповідно; Δe_p - різниця сигналів, яка поступає на компаратор.

Приймається, що підсилювачі, компаратор і джерело регульованої напруги є електричними елементами з лінійною статичною характеристикою. Тому для них можна записати наступне рівняння

$$U_i = k_E e_C, \quad (2)$$

де k_E - узагальнюючий коефіцієнт передачі електричних схем підсилювачів, компаратора і джерела регульованої напруги.

Інтенсивність сигналу ультразвукових коливань (УЗК), який випромінюється ПКВ, можна описати наступним рівнянням

$$I_0 = 2D\sigma P U_i / CrP = k_0 U_i = \rho c (\omega Y_0)^2 / 2, \quad (3)$$

де $k_0 = 2DS\Pi / CrP$ - стала п'єзоелемента; D - жорсткість його пластини S - поверхня пластини; Π - умовний розмір п'єзоелемента; C - його ємність; r - активний опір; P - активна потужність розсіювання; ρ - густина газу; c - швидкість розповсюдження УЗК в газовому середовищі; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота УЗК; f - частота коливань; Y_0 - амплітуда УЗК на вході в газове середовище.

Інтенсивність сигналу УЗК, який досягнув поверхні рідини дорівнює [3]

$$I_{\Pi} = \rho c V_{1m}^2 / 2 = \rho c (\omega Y_{\Pi})^2 / 2, \quad (4)$$

де $V_{1m} = \omega Y_{1m}$ - максимальна коливальна швидкість частинок газу при досягненні поверхні рідини; Y_{Π} - амплітуда сигналу УЗК на поверхні рідини.

Зменшення амплітуди сигналу УЗК обумовлюється поглинанням енергії газовим середовищем. Якщо поглинання інтенсивності сигналу УЗК підпорядковується закону Бугера-Ламберта-Бера, то

$$I_{\Pi} = I_0 \exp(-k_r R), \quad (5)$$

де k_r - коефіцієнт поглинання сигналу УЗК газовим середовищем; R - відстань від випромінювача УЗК до поверхні рідини.

З врахуванням (3) і (4) маємо

$$Y_{\Pi} = Y_0 [1 - \exp(-0,5 k_r R)]. \quad (6)$$

При досягненні поверхні рідини частина енергії сигналу УЗК поглинається рідиною, а друга частина відбивається від поверхні. Якщо рахувати, що процес розповсюдження УЗК у рідині підпорядковується закону Бугера-Ламберта-Бера, то інтенсивність поглинання

$$I_p = I_{\Pi} [1 - \exp(-k_p \delta_p)], \quad (7)$$

де I_p - інтенсивність сигналу УЗК, який поглинається рідиною; k_p - коефіцієнт поглинання УЗК рідиною; δ_p - глибина поглинання УЗК рідиною, яка залежить від її фізико-хімічного складу і температури.

Інтенсивність сигналу УЗК, яка відбивається від поверхні рідини

$$I_B = I_{\Pi} - I_p = I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-k_r R \left(1 + \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

або, враховуючи (2) – (6), маємо

$$Y_B = Y_0 \left\{ 1 - \exp \left[-k_r R \left(1 + \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Інтенсивність сигналу УЗК, яка сприймається п'єзокерамічним елементом

$$I_C = \rho c V_{2m}^2 / 2 = \rho c (\omega Y_C)^2 / 2, \quad (10)$$

де $V_{2m} = \omega Y_C$ - максимальна коливальна швидкість частинок газу при досягненні поверхні п'єзоелектричного елемента; Y_C - амплітуда сприймаючого п'єзоелектричним елементом сигналу УЗК.

Якщо прийняти, що газове середовище для падаючого і відбитого УЗК одне й теж, то інтенсивність поглинання відбитого сигналу УЗК можна описати рівнянням

$$I_C = I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

або

$$Y_C = Y_0 \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (15)$$

Рахуватимемо, що амплітуда e_C електрорушійної сили, яка створюється п'єзоелементом, пропорційна амплітуді Y_C . Тоді маємо

$$e_C = k_{\Pi} Y_0 \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

де k_{Π} - коефіцієнт передачі п'єзоелемента.

З рівняння (2) знайдемо амплітуду випромінюючого імпульса, яка дорівнює

$$Y_0 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2k_0 U_i}{\rho c}}. \quad (13)$$

Підставивши (13) у рівняння (12), маємо

$$e_C = \frac{k_E}{\omega} \sqrt{\frac{2k_0 U_i}{\rho c}} \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (14)$$

Згідно з принципом вимірювання амплітуда e_c створюваного п'єзоелементом електричного сигналу, є сталою величиною. Тоді, приймаючи, що $e_c = E_c = \text{const}$, з (14) одержуємо

$$U_i = \frac{\rho c}{2k_0} \left(\frac{\omega E_c}{k_E} \right) \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (15)$$

Формально рівняння (15) є статичною характеристикою рівноміра зі змінним збуджуючим імпульсом. Нижній рівень збуджуючого імпульса U_H характеризує реперну точку і визначається репером. Відстань R_0 від п'єзоелемента до репера визначається зоною нечутливості рівноміра. Якщо $R = R_0$, то збуджуючий сигнал, який є реперним, дорівнює

$$U_{Pi} = \frac{\rho c}{2k_0} \left(\frac{\omega E_c}{k_E} \right) \exp(2k_r R_0). \quad (16)$$

З врахуванням реперної напруги імпульса і того, що $R = H - L$ рівняння статичної характеристики рівноміра набуває вигляду

$$U_i = \frac{\rho c}{2k_0} \left(\frac{\omega E_c}{k_E} \right) \left[1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right]^{1/2} + \exp(-2k_r R_0). \quad (17)$$

Позначимо $N_0 = \rho c \omega E_c / 2k_0 k_E$. Тоді рівняння (17) приймає наступну форму

$$U_i = N_0 \left[\left\{ 1 - \exp \left[-2k_r R \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2} + \exp(-2k_r R_0) \right]. \quad (18)$$

Розрахована за формулою (18) статична характеристика рівноміра, призначеного для вимірювання рівня води, коли газовим середовищем є повітря, близька до лінійної і має вигляд показаний на рис. 5.

Статична характеристика має зміщення на величину $U_0 = kR_0$ при (див. рис. 5, крива 2) $R_0 = 0$. При градуванні рівноміра на заданий діапазон вимірювання статичну характеристику приводять до наступної форми (рис. 5, крива 3)

$$U_i = N_0 R^2 \left\{ 1 - \exp \left[-2k_r (R + 2R_0) \left(1 + 0,5 \frac{k_p \delta_p}{k_r R} \right) \right] \right\}^{1/2} + \exp(-2k_r R_0) - k_0 R_0, \quad (19)$$

де k_0 - налагоджувальний параметр рівноміра.

Рівень рідини в апараті розраховується в обчислювальному пристрої вимірювальної схеми за формулою $L = k_L (U_{0i} - U_i)$, де k_L - коефіцієнт перетворення рівноміра; U_{0i} - збуджуючий електричний сигнал, який відповідає нульовому рівню рідини в апараті. Експериментальна статична характеристика рівноміра показана на рис. 5, крива 1. Її відхилення від теоретичної не перевищує 0,25 %, що свідчить про адекватність математичних моделей.

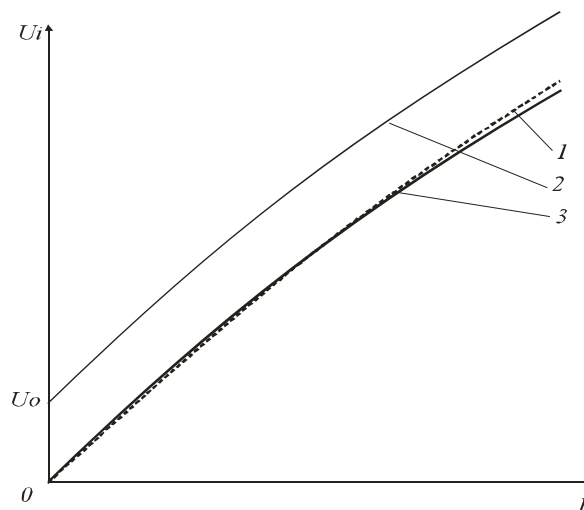


Рис. 5. Статична характеристика рівноміра зі змінним збуджуючим імпульсом.

Висновки. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що статична характеристика компенсаційного ультразвукового рівноміра є близькою до лінійної. Величина нелінійності, в основному, обумовлюється фізико-хімічними параметрами газового середовища, в якому розповсюджуються УЗК. Як показують експериментальні дослідження, при висоті рівня до 20 м нелінійність статичної характеристики не перевищує 0,3 %. Зона нечутливості рівноміра не перевищує 0,2 м. Показано, що компенсаційний принцип

вимірювання дозволяє суттєво зменшити вплив температури, тиску та складу газового середовища на точність контролю.

Література: 1. Патент України на корисну модель 32894 МКВ G 01 F 23/28. Ультразвуковий рівнемір / Рябіченко А.В., Стенцель Й. І.; Заявл. 10. 12. 2007; Опубл. 10.06.2008. Бюл. 11. 2. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичне моделювання ультразвукових рівномірів на основі теорії реологічних переходів. Матеріали другої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції „Актуальні проблеми сучасної науки”. – Київ: 2006. – с.78-81. 3. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

УДК 620.179.14

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
Н.Н. СИРЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, асп., НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

У роботі запропоновано теоретичну модель вихорострумового перетворювача прохідного типу з ферромагнітним зразком представленим у вигляді соленоїда з геометрією витка еквівалентною глибини проникнення електромагнітного поля. Отримано вирази для визначення складових комплексного опору котушки перетворювача та просторовий розподіл еквівалентного опору перетворювача зі зразком.

In the work the theoretical model of bobbin probe type eddy current converter with the ferromagnetic sample represented as a solenoid with geometry of coil to the equivalent depth of penetration of the electromagnetic field is offered. Expressions are got for determination of constituents of complex resistance of bobbin of converter and spatial distributing of equivalent resistance of converter with a sample.

Введение. Для надежного контроля и эффективного диагностирования поверхностного состояния металлических конструкций широко применяется вихретоковый бесконтактный метод неразрушающего контроля. В основе данного метода лежит взаимодействие внешнего по отношению к объекту контроля намагничивающего электромагнитного поля с индуцированными в материале объекта вихревыми токами. Вихретоковый метод контроля постоянно развивается и является весьма перспективным, поскольку обладает рядом существенных преимуществ в силу отсутствия необходимой подготовки поверхности изделия, высокой скорости и автоматизации процесса контроля, возможностью контроля через защитные поверхности и т.д. [1].

Несмотря на достаточное развитие теоретических и прикладных аспектов современных методов и средств вихретокового неразрушающего контроля, надежных и эффективных средств получения и обработки экспериментальных данных в настоящее время не существует.

Иными словами, определение функциональных зависимостей между состоянием объекта и сигналами преобразователя, а также восстановление параметров дефекта или структуры объекта по измеренным данным разработаны слабо в силу большой сложности и многозначности задачи [2].

Надежный метод получения результатов должен опираться на разработанную математическую модель, адекватно описывающую процесс получения экспериментальных данных. Математическую модель можно описать как аналитически, так и численными методами.

Постановка задачи. Основным элементом, преобразующим физические явления в электрический сигнал, при вихретоковом контроле является вихретоковый преобразователь (ВТП). При проектировании ВТП всегда возникает задача определения распределения электромагнитного поля в преобразователе, объекте контроля и окружающем пространстве. Аналитические методы решения подобных задач для определения поля в областях с простой геометрией и однородной средой подробно рассмотрены в [3]. При существенной неоднородности среды целесообразно воспользоваться методами граничных интегральных и пространственных интегральных уравнений [4,5]. Применение перечисленных методов при проектировании ВТП позволяет успешно находить распределение электромагнитного поля в объекте со сложной геометрией и нелинейными свойствами с достаточно высокой точностью, но при больших затратах машинного времени. На данный момент в современных исследованиях в области вихретокового контроля основной упор сделан на совершенствование алгоритмов расчетных операций, направленных на сокращение временных затрат [6]. Эффективность численных методов расчета оценивается по конечным параметрам: точности и производительности программного продукта, простоте реализации. Это, в частности, можно достичь при создании упрощенных моделей ВТП с исследуемым образцом за счет конкретизации параметров контроля объекта и ограничении диапазонов контроля.

Основная часть. Рассмотрим простейшую модель кольцевого витка (см. рис. 1) с поперечным сечением в виде окружности.

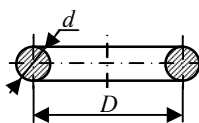


Рис. 1. Схематичное изображение одного витка с поперечным сечением в виде окружности.